

УДК 524.314

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ НАБЛЮДАЕМЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРИН ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ А-F-ЗВЕЗД С МАЛЫМИ СКОРОСТЯМИ ВРАЩЕНИЯ

*И.Ф. Бикмаев, О.А. Аль-Хави,  
А.И. Галеев, В.М. Залялиева*

### Аннотация

В работе выполнен анализ измеренных авторами и опубликованных в литературе эквивалентных ширин линий в спектрах А-F-звезд с малыми скоростями вращения. Точность измерений по наблюдениям на 1.5-метровом телескопе РТТ-150 согласуется с данными, полученными на современных эшелле-спектрометрах. Опубликованные данные, полученные с помощью классических спектрометров, содержат значительные случайные и систематические ошибки, которые ведут к погрешностям определения содержаний химических элементов.

**Ключевые слова:** звезды спектральных классов А-F, эквивалентные ширины спектральных линий.

---

### Введение

В работах [1, 2] были выполнены определения фундаментальных параметров и химического состава атмосфер группы А-F-звезд, часть которых имеет значительные пекулярности химического состава. Несмотря на почти 50-летнюю историю исследования химически пекулярных звезд, до сих пор неизвестно, каким образом пекулярности возникают и нарастают ли они с возрастом звезды, как зависят от других параметров звезд – температуры атмосферы, ускорения силы тяжести, микротурбулентной скорости, скорости вращения и т. д.

Эта задача является сложной во многих отношениях, так как необходимо выполнить наблюдения и анализ большой выборки звезд с различными параметрами атмосфер для получения обоснованных выводов. Большая статистика звезд, необходимая для решения этой задачи, требует получения спектров для нескольких десятков (возможно сотен) звезд. Такой объем работы может оказаться непосильным при использовании одного телескопа, и поэтому возникает естественное желание использовать опубликованные наблюдательные данные других авторов для увеличения статистической значимости результатов. Подавляющее большинство опубликованных работ по определению химического состава звезд основано на использовании эквивалентных ширин линий, измеренных в спектрах звезд. По разным причинам в результатах измерений различных авторов могут присутствовать случайные и систематические ошибки. Использование ошибочных измерений может привести к получению неточных значений содержания химических элементов.

В настоящей работе выполнено сравнение измеренных нами значений эквивалентных ширин спектральных линий с опубликованными в литературе и показано влияние ошибок измерений на определение содержания химических элементов.

Табл. 1

Основные сведения об исследуемых звездах

Номер HD	Звезда	Звездная величина	Спектр	Количество линий
2628	28 And	5.2	A7 III	350
20902	Alfa Per	1.8	F5 Iab	150
27962	68 Tau	4.3	A2 IV	440
32115	—	6.3	A8 IV	620
72037	2 UMa	5.4	A2 IV	485
78362	Tau Uma	4.6	Am	540
95608	60 Leo	4.4	A1 IV	450
142860	41 Ser	3.8	F6 IV	450
146136	94 Her	4.4	F2 II	115
165908	99 Her	5.0	F7 V	520
166230	101 Her	5.1	A8 III	80
182564	58 Dra	4.5	A2 III	135
189849	15 Vul	4.6	A4 III	290
19529	41 Cyg	4.0	F5 Iab	640
209459	21 Peg	5.8	B9.5 V	250

### 1. Наблюдения на 1.5-метровом телескопе РТТ-150

С точки зрения наблюдений с помощью современных эшелле-спектрометров высокого разрешения звезды классов А–F с узкими линиями поглощения (с малой скоростью проекции осевого вращения на луч зрения) являются оптимальными объектами для измерений эквивалентных ширин линий с наиболее высокой точностью. В 2009–2012 гг. на 1.5-метровом телескопе РТТ-150 ((национальная обсерватория ТЮБИТАК, Турция) нами были получены эшелле-спектры высокого разрешения ( $R = 50000$ ) для 15 А–F-звезд с использованием крупноформатной охлаждаемой ПЗС-матрицы фирмы Andor ( $2048 \times 2048$  пикселей), установленной в куде-эшелле спектрометре РТТ-150. Список этих звезд приведен в табл. 1.

Обработка эшелле-спектров была выполнена с помощью современной версии программного комплекса DECH [3]. В последней колонке табл. 1 показано число эквивалентных ширин линий, измеренных нами в спектре соответствующей звезды. Общее число измерений составляет около 5000 эквивалентных ширин.

Спектральные наблюдения А–F-звезд с высоким разрешением в период 1970–1990 гг. выполнялись с применением фотографических пластинок, которые обеспечивали регистрацию спектров в широком диапазоне длин волн. Однако невысокое отношение сигнал/шум ( $S/N = 30\text{--}50$ ) не позволяло измерять эквивалентные ширины линий с высокой точностью. В результате, относительно хорошая точность химического состава получалась лишь для тех элементов, которые были представлены в спектре большим числом линий (таких как железо, хром, никель). К концу XX в. усилиями различных групп авторов была опубликована большая серия статей, в которых был исследован химический состав нескольких десятков А–F-звезд и обнаружены звезды с пекулярностями химического состава. Однако в силу ограниченности отношения сигнал/шум на фотографических спектрах полученные результаты были отягощены большими случайным и систематическими ошибками. В первом десятилетии XXI в. начали выполняться детальные исследования пекулярных звезд на основе спектров, полученных современными спектрометрами высокого разрешения, оснащенными крупноформатными ПЗС-матрицами. Это позволило достичь высокого отношения сигнал/шум ( $S/N = 200\text{--}300$ ) и существенно уменьшить случайные ошибки измерений эквивалентных ширин линий.

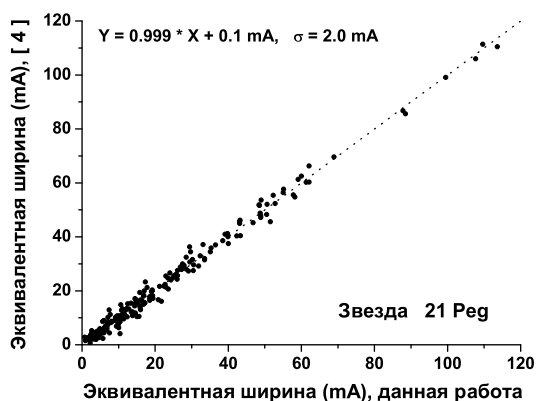


Рис. 1. Сравнение измеренных эквивалентных ширин в спектре звезды 21 Peg с опубликованными в [4]

## 2. Сравнение с наблюдениями, выполненными с помощью современных эшелле-спектрометров

На рис. 1 показано сравнение измеренных нами эквивалентных ширин в спектре звезды 21 Peg с опубликованными в работе [4]. Опубликованные данные получены путем наблюдений со спектральным разрешением  $R = 65000$ , выполненных с помощью куде-эшелле спектрометра 2.6-метрового телескопа, установленного на Канарских островах. Согласно данным авторов, отношение сигнал/шум в их спектрах составляет  $S/N = 300$ . На данном и последующих рисунках показаны уравнения линейной регрессии между двумя наборами данных – измеренных нами ( $X$ ) и опубликованных в [4] ( $Y$ ). Коэффициент 0.999 на рис. 1 указывает на практическое совпадение систем эквивалентных ширин, то есть на отсутствие каких-либо систематических различий в двух наборах данных. Среднеквадратичная ошибка составляет 2 мÅ. Она соответствует предельно высокой точности измерения эквивалентной ширины при указанных спектральном разрешении и отношении сигнал/шум.

На рис. 2 показано сравнение измеренных нами эквивалентных ширин в спектре звезды HD 32115 с опубликованными в работе [5]. Эти результаты получены по наблюдениям со спектральным разрешением  $R = 60000$ , выполненным с помощью куде-эшелле спектрометра 2.7-метрового телескопа в Обсерватории МакДональд (США). Коэффициент наклона в уравнении регрессии равен 0.988, то есть систематические различия в измеренных нами и опубликованных данных составляют порядка одного процента. Это различие в несколько раз ниже случайной ошибки измерения эквивалентной ширины, которая в данном случае составляет 3.5 мÅ и также отражает высокую точность взаимных измерений.

Таким образом, можно сделать вывод, что точность измерений эквивалентных ширин линий по наблюдениям на 1.5-метровом телескопе РТТ-150 соответствует мировому уровню, который определяется лучшими современными эшелле-спектрометрами.

## 3. Сравнение с наблюдениями, выполненными с помощью классических спектрометров

Во второй половине XX в. спектральные наблюдения выполнялись с использованием классических дифракционных решеток в низких (1–4) порядках спектра, в отличие от эшелле-решеток, имеющих высокий порядок (60–150). Назовем

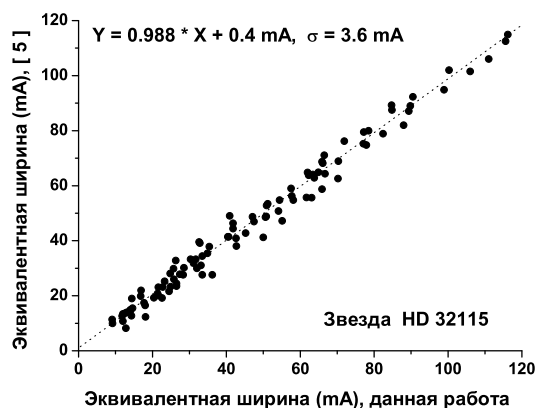


Рис. 2. Сравнение измеренных эквивалентных ширин в спектре звезды HD 32115 с опубликованными в [5]

такие спектрометры классическими, чтобы отличить их от современных эшелле-спектрометров. До 90-х годов в качестве приемников излучения в классических спектрометрах использовались фотографические пластинки, позволяющие регистрировать одновременно широкий диапазон длин волн (в силу своих размеров – 10–30 см), но с низким отношением сигнал/шум (менее 100). С конца XX в. фотопластинки полностью были вытеснены современными приемниками излучения – ПЗС-матрицами.

На рис. 3 показано сравнение измеренных нами эквивалентных ширин в спектре звезды 21 Peg с опубликованными в работе [6]. Последние получены на основе наблюдений со спектральным разрешением  $R = 55000$ , которые выполнены с помощью классического спектрометра 1.2-метрового телескопа, установленного в Доминьонской астрофизической обсерватории (Канада). Поскольку в качестве детектора использовались фотопластинки, отношение сигнал/шум в спектрах составляет около 50. На рис. 3 показан график линейной регрессии между двумя наборами данных – измеренных нами и опубликованных. Коэффициент 1.03 указывает на близость систем эквивалентных ширин, то есть на отсутствие значительных систематических различий в двух наборах данных. Однако среднеквадратичная ошибка составляет  $5.3 \text{ mÅ}$ . Она значительно превышает ошибки измерений, полученных с использованием ПЗС-матриц (см. рис. 1), и соответствует низкому отношению сигнал/шум в фотографических спектрах.

На рис. 4 показано сравнение измеренных нами эквивалентных ширин в спектре звезды 99 Her с опубликованными в работе [7], полученными в результате наблюдений со спектральным разрешением  $R = 55000$ , которые выполнены с помощью классического спектрометра 1.2-метрового телескопа в Доминьонской астрофизической обсерватории (Канада). В качестве детектора использовались ПЗС-матрицы, отношение сигнал/шум в спектрах, по данным авторов работы, составляет 200. На рис. 4 показан график линейной регрессии между двумя наборами данных – измеренных нами и опубликованных. Коэффициент 0.843 в уравнении связи указывает на значительные систематические ошибки в опубликованных данных. При этом и среднеквадратичная ошибка очень велика и составляет  $9.6 \text{ mÅ}$ .

Возможная причина систематической недооценки эквивалентных ширин линий, измеренных в работе [7], может быть связана с эффектом недоучета рассеянного света в классических спектрографах. Систематическая недооценка эквивалентных ширин линий может привести к занижению величины параметра

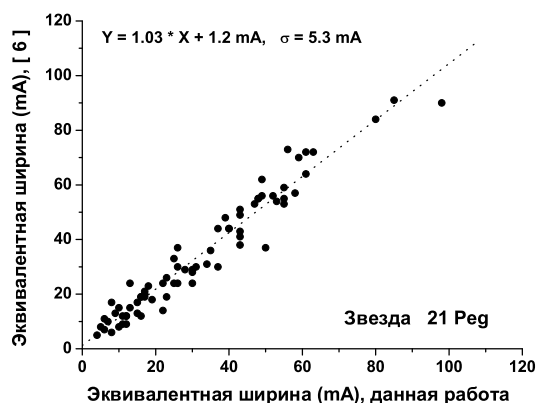


Рис. 3. Сравнение измеренных эквивалентных ширин в спектре звезды 21 Peg с опубликованными в [6]

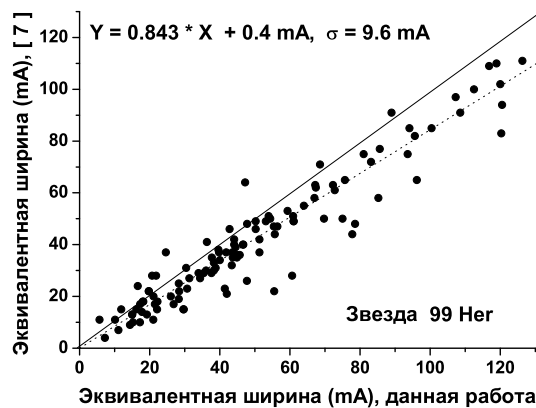


Рис. 4. Сравнение измеренных эквивалентных ширин в спектре звезды 99 Her с опубликованными в [7]

микротурбулентной скорости, что, в свою очередь, вызовет завышенные значения содержания элементов, определяемых по линиям в диапазоне эквивалентных ширин 50–120 mÅ.

#### 4. Влияние ошибок измерений эквивалентных ширин линий на точность определения химического состава

Значительные систематические и случайные ошибки измерений эквивалентных ширин линий, содержащиеся в опубликованных измерениях других авторов, могут привести к соответствующим погрешностям в определении содержаний химических элементов.

На рис. 5 показаны результаты определения химического состава звезды 99 Her, полученные в работах [2, 7]. Результаты работы [2] основаны на высокоточных наблюдениях, выполненных на куде-эшелле спектрометре 1.5-метрового телескопа РТТ-150.

Из рис. 5 видно, что для многих элементов (C, Mg, V, Mn, Y, La) наблюдаются существенные различия в содержаниях элементов, превышающие ошибки их определения. Причина различий связана с большими ошибками в измеренных эквивалентных ширинах линий в работе [7], которые видны на рис. 4.

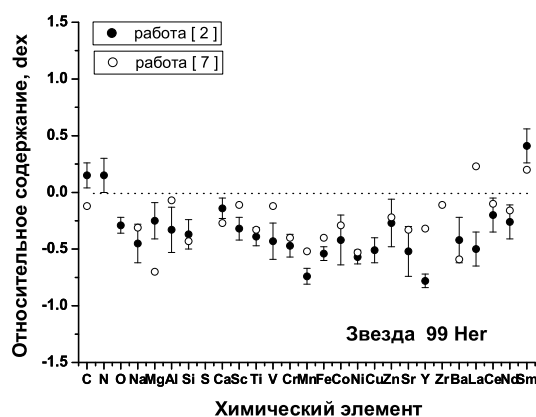


Рис. 5. Сравнение химического состава звезды 99 Her, полученного в [2, 7]

## 5. Выводы

Большое количество спектральных наблюдений, выполненное разными авторами в предыдущие годы, позволило им определить содержания химических элементов для многих А-Ф-звезд. Однако прежде чем использовать эти результаты определения содержания элементов, необходимо выполнить анализ опубликованных авторами эквивалентных ширин спектральных линий. Сравнение опубликованных данных с результатами наших измерений по наблюдениям на 1.5-метровом телескопе РТТ-150 позволило сделать следующие выводы.

1. Эквивалентные ширины линий, основанные на наблюдениях на РТТ-150, с высокой точностью согласуются с данными, полученными на лучших современных эшелле-спектрометрах мира. Систематические различия лежат в пределах одного процента, а случайные ошибки составляют единицы миллиангстрем.

2. Опубликованные эквивалентные ширины, полученные на классических спектрометрах, обладают существенными погрешностями. Систематические ошибки могут достигать 10–15%, а случайные ошибки – 5–15 мÅ.

Таким образом, определения химического состава группы А-Ф-звезд, выполненные в работе [2], являются наиболее достоверными, так как основаны на наиболее точных определениях эквивалентных ширин спектральных линий. Большой массив высокоточных измерений эквивалентных ширин линий (около 5000 измерений), полученный для 15 звезд из табл. 1, позволяет использовать их в качестве стандартов при сравнении с результатами наблюдений других авторов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-02-00351-а).

## Summary

*I.F. Bikmaev, O.A. Al-Hawi, A.I. Galeev, V.M. Zalyalieva.* Accuracy Analysis of Equivalent Width Measurements in the Spectra of Slowly Rotating A-F-Stars.

Based on the measurements made by the authors and published in the literature, the work analyzes the equivalent widths of spectral lines in the spectra of slowly rotating A-F-stars. The accuracy of the measurements made with 1.5-meter RTT-150 telescope is in good agreement with the data obtained with modern coude' echelle spectrometers. The published data obtained using classical spectrometers contain substantial accidental and systematic errors, which lead to inaccuracies in chemical abundance determinations.

**Keywords:** A-F-type stars, equivalent widths of spectral lines.

## Литература

1. Аль-Хави О.А., Бикмаев И.Ф., Мельников С.С., Бикмаева М.И., Сахибуллин Н.А. Определение фундаментальных параметров атмосфер группы А–F-звезд // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155, кн. 2. – С. 184–188.
2. Аль-Хави О.А., Бикмаев И.Ф., Мельников С.С., Бикмаева М.И., Сахибуллин Н.А. Исследование химического состава атмосфер нормальных и пекулярных А–F-звезд // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155, кн. 3. – С. 5–11.
3. Галазутдинов Г.А. Система обработки звездных эшелле-спектров. I. Обработка изображений. II. Обработка спектров. Препринт № 92. – Нижний Архыз: CAO РАН, 1992. – 52 с.
4. Fossati L., Ryabchikova T., Bagnulo S., Alecian E., Grunhut J., Kochukhov O., Wade G. The chemical abundance analysis of normal early A- and late B-type stars // Astron. Astrophys. – 2009. – V. 503, No 3. – P. 945–962.
5. Fossati L., Ryabchikova T.A., Shulyak D.V., Haswell C.A., Elmasli A., Pandey C.P., Barnes T.G., Zwintz K. The accuracy of stellar atmospheric parameter determinations: a case study with HD 32115 and HD 37594 // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2011. – V. 417, No 1. – P. 495–507.
6. Sadakane K. Abundance analyses of 21 Pegasi (B9.5 V) and HR 7338 (A0 III) // Publ. Astron. Soc. Pac. – 1981. – V. 93. – P. 587–593.
7. Adelman S.J., Caliskan H., Kocer D., Cay I.H., Gokmen T.H. Elemental abundance analyses with DAO spectrograms – XXIII. The superficially normal stars 28 And (A7 III) and 99 Her (F7 V) // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2000. – V. 316, No 3. – P. 514–518.

Поступила в редакцию  
15.05.13

---

**Бикмаев Ильфан Фяритович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: [ibikmaev@yandex.ru](mailto:ibikmaev@yandex.ru)

**Аль-Хави Омар А. Абдулнаби** – аспирант кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: [omaralsamarrai@yahoo.com](mailto:omaralsamarrai@yahoo.com)

**Галеев Алмаз Ильсурович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: [almazgaleev2@yandex.ru](mailto:almazgaleev2@yandex.ru)

**Залялиева Венера Мингазовна** – ассистент кафедры вычислительной физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: [zvm84@mail.ru](mailto:zvm84@mail.ru)